



10. Úloha

Měření vlastností piezoelektrických materiálů

1 Teoretický úvod

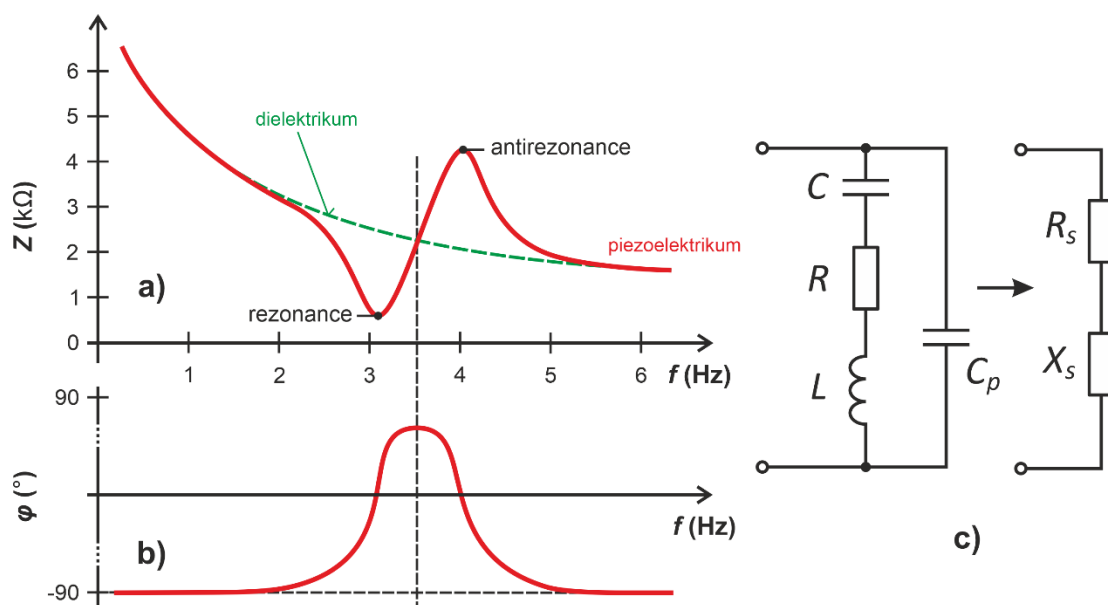
Piezoelektrické materiály (piezoelektrika) jsou v dnešní době často využívány v mnoha oborech lidské činnosti. Spektrum aplikací zahrnuje senzory, převodníky mechanických veličin, aktuátory, ultrazvukové zdroje a piezoelektrické motorky.

Piezoelektrika patří mezi speciální dielektrické materiály. V běžných dielektrických materiálech je díky typickým kovalentním vazbám většina nábojů (elektronů i iontů) pevně vázána v krystalické struktuře. Elektrony ani ionty tedy nelze využít k vedení proudu jako u kovů – jde o tzv. vázané nosiče náboje. Vnější elektrické pole sice také působí i na vázané náboje, ale dokáže vyvolat pouze jejich malé výchylky kolem rovnovážných poloh v krystalové mřížce. Pokud nemá krystalová mřížka střed symetrie, vzniká nesymetrické uspořádání nábojů charakterizované nenulovým dipólovým momentem.

Pokud budeme na takovouto nesymetrickou strukturu působit vnější mechanickou silou, dojde k její deformaci a spolu s deformací krystalové mřížky se posouvají i elektrické náboje v její struktuře. Velikost dipólového momentu je přímo úměrná velikosti působícího tlaku. Tento jev byl nazván jako **přímý piezoelektrický jev** (podle řeckého slova *piezō* s významem tlačit). Kromě přímého jevu existuje také **obrácený piezoelektrický jev**, který spočívá ve vzniku mechanické deformace generované v látce elektrickým polem.

Oba jevy existují pouze v krystalických strukturách bez středu symetrie, a to ještě vzhledem ke krystalové mřížce jen v některých určitých směrech. Dipólové momenty také existují v látce pouze během zatížení krystalu mechanickým tlakem. Bez stlačení je piezoelektrikum elektricky neutrální. Podobně u obráceného piezoelektrického jevu se krystal mechanicky deformuje pouze při působení elektrického pole a po jeho vypnutí se krystal vrací zpět do stavu, v kterém se nacházel před deformací vyvolanou elektrickým polem.

Působí-li tedy na piezoelektrický element střídavé elektrické pole, mění se jeho rozměry v souladu s průběhem tohoto pole. Tato přeměna elektrické energie na mechanickou probíhá nejúčinněji při tzv. **rezonanční frekvenci**, která závisí na materiálu, tvaru a objemu zvoleného piezoelektrického elementu. Při zvyšování frekvence působícího pole se první rezonanční stav objeví při frekvenci f_r , při níž je měřená impedance minimální. Při dalším nárůstu frekvence se impedance zvyšuje až do maxima, kdy nastává tzv. **antirezonance** při frekvenci f_a .



Obr. 1: Závislost impedance na frekvenci u běžného dielektrika a piezoelektrika (a), závislost fázového úhlu na frekvenci (b) a náhradní obvod piezoelektrického elementu (c).

Koeficient elektromechanické vazby k

Koeficient k je ukazatelem efektivity přeměny elektrické energie v mechanickou nebo naopak konverze mechanické energie v elektrickou. Písmeno k se ještě v indexu doplňuje o označení směru, v němž jsou rozmístěny elektrody (plocha elektrod je k tomuto směru kolmá) a směru, v němž je mechanická energie aplikována nebo se projevuje. Jedním z možných případů je stanovení k pro tenký plochý disk piezoelektrika, na který jsou elektrody umístěny (a elektrické pole směřuje) ve směru osy Z a vibrace jsou radiální (polární), což znamená, že se projevují kolmo ke směru elektrického pole (tedy ve směru osy X a Y). V tomto případě se používá koeficient vazby s označením k_p (*planar coupling factor*).

Při stanovení hodnoty koeficientu vazby lze vyjít z ekvivalentního náhradního obvodu piezoelektrického elementu. Indukčnost L představuje setrvačnou mechanickou hmotu, odpor R energetické ztráty, kapacita C mechanickou tuhost elementu a kapacita C_p jeho elektrickou kapacitu. V náhradní sériové kombinaci je pak R_s reálná a X_s imaginární část impedance. Rezonance obvodu nastane ve chvíli, kdy je imaginární část impedance rovna 0. Sériová rezonance obvodu odpovídá rezonanční frekvenci (nižší), paralelní rezonance nastane ve chvíli, kdy systém dosáhne antirezonance (vyšší frekvence).



Pro koeficient k_p platí vztah

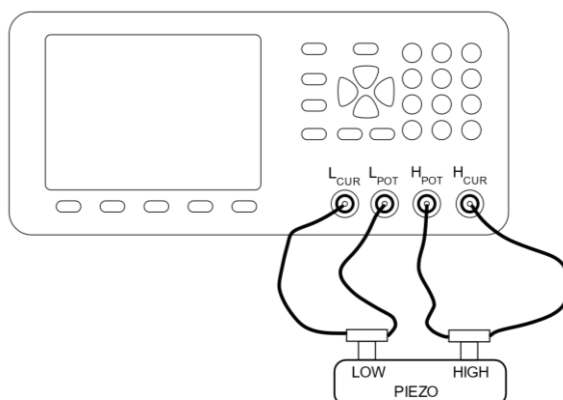
$$k_p \cong \sqrt{\left[\left(2,51 \cdot \frac{f_a - f_r}{f_a} \right) - \left(\frac{f_a - f_r}{f_a} \right)^2 \right]} \quad (1)$$

2 Zadání úlohy

- 1) Pomocí RLC můstku proveďte měření frekvenčních charakteristik (impedance Z , fázový úhel φ) dvou odlišných piezoelektrických měničů (piezoelementů).
- 2) V okolí rezonanční a antirezonanční frekvence každého měniče proveďte detailnější měření s krokem 20 Hz a nalezněte hodnoty obou frekvencí.
- 3) Získané závislosti $Z = f(f)$ a $\varphi = f(f)$ pro měřené piezoelektrické měniče vyneste do grafů. Do jednoho grafu vyneste závislosti $Z = f(f)$ s hrubým dělením (krok 50 nebo 100 Hz) pro oba měniče. Do dalších grafů vyneste závislosti $Z = f(f)$ a $\varphi = f(f)$ s jemným dělením (krok 20 Hz) pro každý měnič samostatně.
- 4) Dle vztahu (1) vypočítejte pro oba měniče koeficient elektromechanické vazby k_p .

3 Používané přístroje a další laboratorní vybavení

- přípravky s piezoelektrickými měniči (měnič KBI-2734 a měnič KPSG-100)
- RLC můstek
- propojovací koaxiální kabely s BNC konektory



Obr. 2: Názorné zobrazení propojení přípravku s piezoelektrickým měničem a RLC můstku.



4 Postup měření

1. Měřicí přípravek s piezoelektrickým měničem připojte pomocí čtveřice koaxiálních kabelů k RLC můstku. Dbejte na značení konektorů na RLC můstku i na měřicím přípravku (propojení konektoru HIGH na přípravku s konektory H_{POT} a H_{CUR} na můstku, propojení konektoru LOW na přípravku s konektory L_{POT} a L_{CUR} na můstku).
2. Zapněte RLC můstek tlačítkem POWER.
3. Nejprve proveďte základní měření frekvenčních závislostí impedance a fázového úhlu piezoelektrického měniče ve frekvenčním rozsahu:
 - 2 500 Hz až 3 500 Hz s krokem 50 Hz pro měnič KBI-2734,
 - 1000 Hz až 2 500 Hz s krokem 100 Hz pro měnič KPSG-100.
4. Na čelním panelu RLC můstku proveďte základní nastavení měření. Pomocí tlačítka volby měření se nejprve přepněte na měření impedance ($Z - \theta$). (Pro označení fázového úhlu φ můstek používá znak θ .) S pomocí šipek pak najedte na volbu nastavení veličin a s pomocí numerické klávesnice nebo kontextových tlačítek nastavte jednotlivé veličiny na čelním panelu na následující hodnoty (aktuální nastavovaná veličina je podbarvena červeně):
 - FREQ (měřicí frekvence) = 1000/2500 Hz,
 - LEVEL (napětíová úroveň) = 0,5 V_{RMS} ,
 - RANGE (měřicí rozsah) = AUTO,
 - SPEED (rychlost měření) = SLOW.
5. Poznamenejte si hodnotu impedance Z a fázového úhlu θ . Přesuňte se na nastavení měřicí frekvence a měňte frekvenci s daným krokem. Při volbě kontextovými tlačítky se šípkami $>$ a $<$ pohybujete po jednotlivých cifrách, tlačítka INC a DEC zvyšujete nebo snižujete hodnotu číslice pod kurzorem o jednotku (tzn. nastavíte-li kurzor na stovky Hz, lze pohodlně zvyšovat měřicí frekvenci s krokem 100 Hz). Hodnoty Z a θ pro příslušné frekvence zapisujte do tabulky.
6. Prostudujte tabulku naměřených hodnot a najděte frekvence, kde je impedance nejnižší a nejvyšší (předpokládané oblasti výskytu rezonanční a antirezonanční frekvence sledovaného elementu). Zároveň by dle teoretických předpokladů mělo platit, že fázový úhel je v případě rezonance roven nule (impedance má pouze reálnou složku).
7. Proveďte detailní měření v oblasti rezonance a antirezonance elementu. Od zjištěné rezonanční frekvence odečtěte 100 Hz a k antirezonanční frekvenci 100 Hz přičtěte. Tím vznikne pásmo, ve kterém obě sledované frekvence leží. Toto pásmo proměřte obdobně, jako v předchozím případě, ale s jemnějším krokem 20 Hz (zadávání frekvencí tedy jen přes numerickou klávesnici). Opět zapisujte hodnoty impedance a fázového úhlu.
8. Po proměření prvního piezoelektrického měniče připojte k RLC můstku přípravek s druhým piezoelektrickým měničem a měření opakujte.